

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВАРИАНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ ПАРОСИЛОВЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ С ПРЯМОТОЧНЫМИ КОТЛАМИ

© 2018 г. В. А. Биленко*, В. В. Жигунов

ЗАО “Интеравтоматика”, 115280, Россия, Москва, Автозаводская ул., д. 14

*e-mail: bilenko@ia.ru

Поступила в редакцию 29.08.2017 г.

Принята в печать 27.09.2017 г.

Существенное усложнение решаемых российскими энергоблоками энергосистемных задач и вызванная этим необходимость обеспечения полностью автоматической работы энергоблока в режиме рабочих нагрузок потребовали усовершенствования структурных схем систем автоматического регулирования частоты и мощности (САУМ). Оказалось, что далеко не всегда принятые исходно в 80-х годах прошлого века решения, в частности применение классических вариантов САУМ-1 и САУМ-2 (САУМ – система автоматического управления мощностью), обеспечивают требуемое качество отработки энергосистемных возмущений. В данной статье выполнен сравнительный анализ шести вариантов САУМ, соответствующих как классическим САУМ-1 и САУМ-2, так и их комбинациям. Исследование проведено на математической модели при характерных видах возмущений: частотой сети, заданным значением мощности энергоблока и нагрузкой котла. Модель получена путем аппроксимации экспериментальных кривых разгона энергоблока мощностью 300 МВт с прямоточным котлом (Каширская ГРЭС, энергоблок № 3). Анализ качества регулирования выполнен путем сравнения амплитудно-частотных характеристик и кривых переходных процессов сопоставляемых вариантов САУМ, а также значений интегральных квадратичных критериев и максимальных отклонений регулируемых величин и регулирующих воздействий в ходе этих процессов. Наиболее предпочтительными оказались комбинированная САУМ и усовершенствованная САУМ-2. Варианты комбинированной САУМ имеют преимущество в качестве поддержания давления пара, а усовершенствованная САУМ-2 – в качестве регулирования мощности энергоблока, причем в первом случае преимущество несколько больше, чем во втором. Схемы обоих вариантов успешно применяются в течение долгого времени на многих энергоблоках страны.

Ключевые слова: система автоматического регулирования частоты и мощности, энергосистемные задачи, энергоблок, прямоточный котел, амплитудно-частотная характеристика, интегральный квадратичный критерий, возмущения

DOI: 10.1134/S004036361804001X

В последнее десятилетие роль крупных энергоблоков в решении энергосистемных задач принципиально изменилась. Такие факторы, как выход приказа РАО “ЕЭС России” № 524 от 18.09.2002 г., технические требования которого нашли дальнейшее развитие в Стандарте ОПРЧ (общего первичного регулирования частоты), вступление в силу в 2005 г. Стандарта нормированного первичного и автоматического вторичного регулирования частоты (соответственно НПРЧ и АВРЧ), а затем и появление рынка системных услуг, существенно повысили важность оснащения крупных энергоблоков современными системами автоматического регулирования частоты и мощности.

Сегодня ни один новый или реконструированный энергоблок не может быть введен в эксплуатацию, если он не прошел испытания на соответствие требованиям ОПРЧ. Кроме того, постоянно увеличивается количество энергоблоков, участвующих в рынке НПРЧ.

Результаты первого этапа внедрения САУМ, удовлетворяющие новым системным требованиям (2002–2008 гг.), изложены в [1]. Данная публикация посвящена вопросам совершенствования структурных схем САУМ на основе сравнения динамических свойств различных вариантов их реализации. При этом из трех перечисленных направлений (ОПРЧ, НПРЧ и АВРЧ) проблемы ди-

намики регулирования возникают только при ОПРЧ и НПРЧ, так как и при испытаниях на соответствие этим требованиям, и при реальных энергосистемных возмущениях отклонения частоты имеют вид скачкообразных или близких к ним возмущений. Задание же по АВРЧ поступает в виде линейно нарастающих возмущений, как правило, с не очень большими скоростями, и их обработка особых трудностей не вызывает.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ САУМ

Как известно, существует два основных принципа построения САУМ. В первом случае (так называемая САУМ-1) регулирование мощности энергоблока N выполняет котельный регулятор мощности (КРМ), а давления пара перед турбиной p'_t – турбинный регулятор мощности (ТРМ). Во втором случае (САУМ-2) функции этих регуляторов противоположны.

Принятые еще в советское время типовые решения по САУМ для энергоблоков с прямоточными котлами [2] были ориентированы на САУМ-1, усовершенствованную для увеличения приемистости энергоблока подачей входного небаланса КРМ ($N_{зд} - N$, где $N_{зд}$ – заданное значение мощности) на турбинный регулятор мощности – так называемая координированная система [3]. Однако в процессе решения сформулированных ранее энергосистемных задач (ОПРЧ, НПРЧ, АВРЧ) подобные решения оказались недостаточными. Это подтвердилось результатами первых испытаний на соответствие требованиям ОПРЧ на пылеугольном энергоблоке № 1 мощностью 800 МВт Березовской ГРЭС [4]. Одним из путей преодоления возникших трудностей был переход на комбинированную структуру САУМ с объединением в определенных долях САУМ-1 и САУМ-2 [1]. Еще одно решение, позволившее получить заметное улучшение качества работы САУМ, – применение усовершенствованного варианта САУМ-2 с вводом в котельный регулятор давления дополнительного дифференцирующего сигнала по давлению пара. Этот вариант был предложен В.В. Жигуновым в 2002 г., а впоследствии изложен в [5, 6].

В связи с широким использованием комбинированных вариантов САУМ стало принятым называть оба входящих в нее регулятора регуляторами мощности и различать их по типу технологического оборудования, на который они воздействуют: котел или турбину, т.е. КРМ и ТРМ. Такой подход используется и в настоящей статье.

Для анализа систем автоматического управления мощностью энергоблока их традиционно

рассматривают (рис. 1) в виде двухсвязных автоматических систем регулирования (АСР) с двумя регулируемыми параметрами (активной мощностью энергоблока N и давлением пара перед турбиной p'_t) и с двумя регулирующими воздействиями (клапанами паровой турбины H_t и изменением нагрузки котла μ_k). Каналы такого объекта по p'_t и N при изменении нагрузки котла характеризуются большой инерцией, определяемой динамикой котла. Постоянные времени объекта по этим каналам достигают нескольких минут. Динамические процессы, происходящие в объекте регулирования при возмущении клапанами турбины H_t , характеризуются существенно меньшей инерцией – постоянные времени начальных участков переходных характеристик составляют несколько секунд. Поэтому при использовании САУМ-1 (см. рис. 1, а) отклонения давления p'_t от заданного $p'_{t,зд}$ будут минимальными и действующие на него (давление) возмущения будут отрабатываться достаточно быстро. При этом регулирование мощности N будет происходить в темпе котла, с учетом его инерции, и, следовательно, отклонения по этому параметру от $N_{зд}$ будут большими по сравнению с отклонениями давления (см. рис. 1, в). В “обратной” схеме – САУМ-2 (см. рис. 1, б), где давление пара перед турбиной p'_t поддерживается КРМ, а мощность N – ТРМ, возникает противоположная ситуация: удастся быстро и точно поддерживать N и существенно хуже p'_t (см. рис. 1, г).

На рис. 2, а показаны комплексные частотные характеристики (КЧХ) эквивалентных объектов для КРМ, а на рис. 2, б – соответствующие области запаса устойчивости ПИ-регуляторов. На этом рисунке k_p – коэффициент усиления, $T_{ин}$ – постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора¹.

Эквивалентный объект для КРМ в САУМ-1 (см. рис. 1, а) представляет собой классический объект с самовыравниванием (сплошная линия на рис. 2, а), что обеспечивает существенно большую область запаса устойчивости для КРМ (сплошная линия на рис. 2, б) по сравнению с аналогичной областью для КРМ в САУМ-2 (пунктирные линии на рис. 2, а и б). Вызвано это тем, что эквивалентный объект КРМ в САУМ-2 не обладает самовыравниванием, тем самым значительно уменьшая область заданного запаса

¹ Здесь и далее размерность коэффициентов в передаточных функциях объекта и регулятора выражается в процентах, постоянных времени – в секундах.

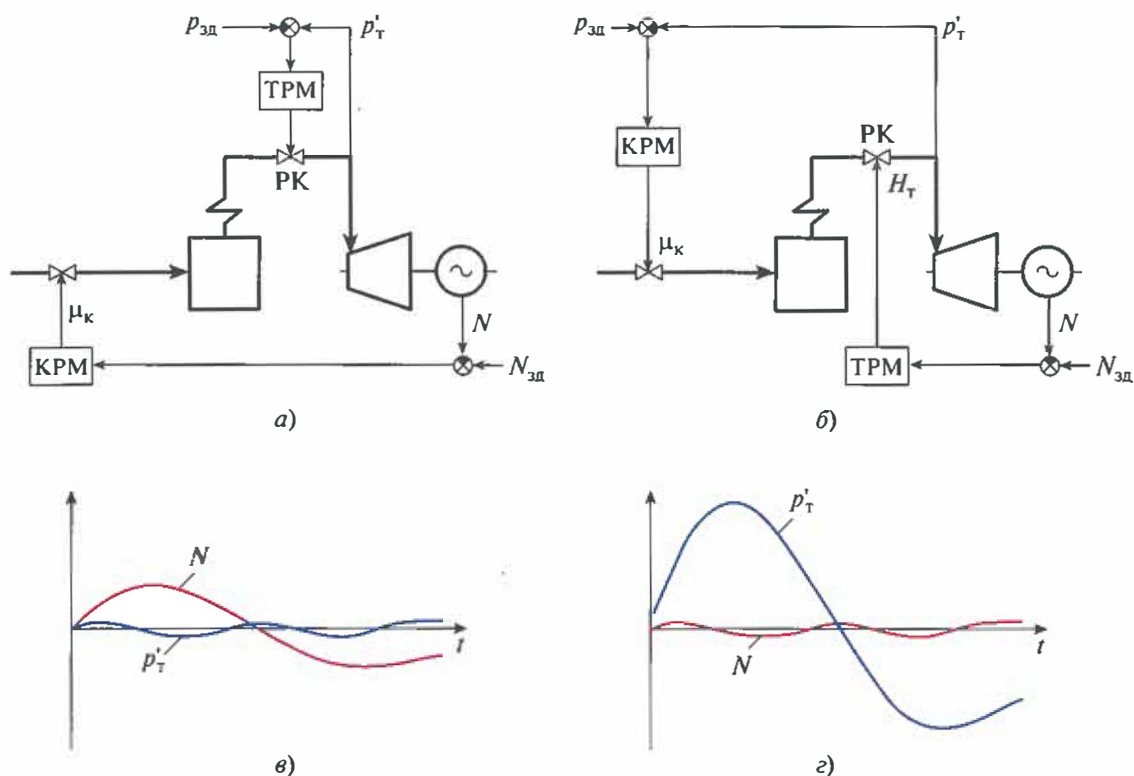


Рис. 1. Структурные схемы АСР мощности/давления пара и качество поддержания мощности N и давления пара p'_T во времени при построении данной АСР. a, c – САУМ-1; b, d – САУМ-2

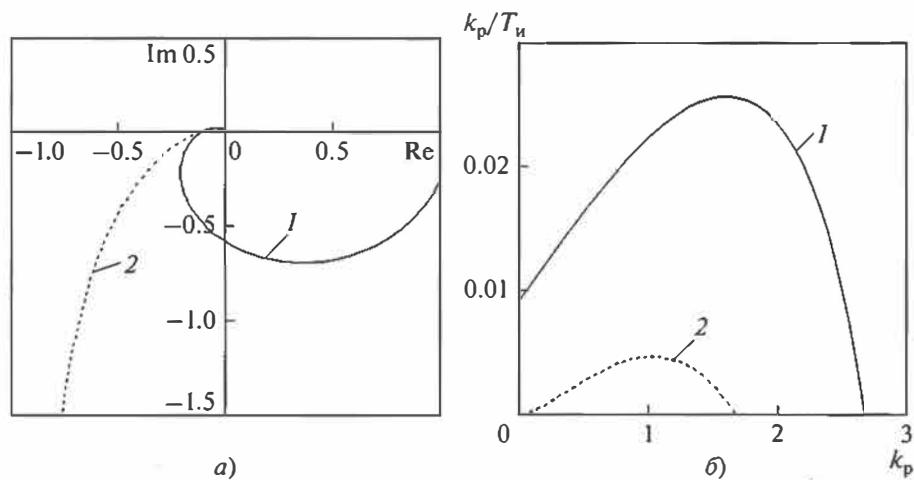


Рис. 2. Комплексные частотные характеристики объектов для КРМ (а) и границы запаса устойчивости котельных ПИ-регуляторов (б). 1 – САУМ-1; 2 – САУМ-2

устойчивости КРМ и приводя к существенному ухудшению качества поддержания давления. В то же время качество поддержания мощности энергоблока в САУМ-2 (см. рис. 1, d) по сравнению с САУМ-1 (см. рис. 1, c) оказывается значительно

выше благодаря существенно лучшей динамике сигнала по мощности энергоблока при возмущении клапанами турбины, чем при возмущении нагрузкой котла. Указанные свойства САУМ-1 и САУМ-2 и являются причиной того, что в совре-

менных условиях обе схемы в "чистом" виде, как правило, не применяются, уступая место усовершенствованным вариантам САРЧМ, которые будут рассмотрены далее.

ВЫБОР МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Автоматические системы регулирования крупных современных энергоблоков с прямоточными котлами представляют собой многосвязные АСР с большим числом локальных АСР, многие из которых связаны между собой. Безусловно, наличие таких взаимосвязей с другими локальными АСР характерно и для САРЧМ верхнего уровня автоматического регулирования энергоблока. Дело в том, что воздействие на котел представляет собой координированное управление его основными регулирующими воздействиями: расходами питательной воды, топлива, воздуха и т.д., — каждое из которых наряду с изменением нагрузки котла обеспечивает поддержание его технологических параметров: температурного режима пароводяного тракта, качества процесса горения и т.п. Наибольшую сложность вызывает образование трехсвязной АСР, регулирующими воздействиями которой являются перемещение клапанов турбины H_T , изменения расходов питательной воды и топлива, а регулируемые величинами — мощность энергоблока N , давление пара перед турбиной и температура пара в промежуточном сечении тракта котла до первого впрыска $t_{\text{пром}}$. В этой трехсвязной АСР наиболее существенными факторами, осложняющими работу регуляторов, являются:

взаимосвязь между каналами регулирования нагрузки котла и энергоблока в целом (по мощности или/и по давлению) и температуры пара, так как обе эти задачи решаются изменением двух основных регулирующих параметров котла: расходов топлива и питательной воды; причем особо неблагоприятным это оказывается для пылеугольных котлов из-за относительно высокого уровня возмущений изменением расхода топлива;

влияние в режиме скользящего давления изменения давления пара перед турбиной на температуру пара в промежуточном сечении тракта котла [7].

В то же время, как следует из накопленного в российской энергетике опыта, обе эти проблемы решаются. Требуемая степень развязки каналов регулирования нагрузки котла и его температурного режима, если необходимо, обеспечивается вводом динамически преобразованного небаланса температуры пара на вход котельного регулятора мощности и/или давления [8], а влияние изме-

нения давления пара на температуру компенсируется [7] подачей демпфированного статического сигнала давления пара, корректирующего заданное значение температуры.

Данные решения обеспечивают возможность независимого рассмотрения задач регулирования нагрузки энергоблока, с одной стороны, и температурного режима пароводяного тракта котла, с другой, и тем самым обуславливают возможность достаточно независимого решения данных задач и проведения автономного сравнительного анализа структурных схем САРЧМ.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОСНОВНЫХ ВАРИАНТОВ САУМ ЭНЕРГОБЛОКОВ С ПРЯМОТОЧНЫМИ КОТЛАМИ

Рассматриваемые структурные схемы приведены на рис. 3, а варианты САУМ — в табл. 1. Объект управления представлен в виде четырехплюсника, который имеет два регулирующих воздействия:

координированное изменение основных регулирующих органов котла μ_k (топлива, питательной воды, воздуха и т.д.);

изменение положения клапанов турбины H_T' — и два регулируемых параметра:

мощность энергоблока N ;

давление свежего пара перед турбиной p_T' .

На структурных схемах также представлено возмущение изменением нагрузки котла (λ_k) в предположении, что динамика канала действия возмущения эквивалентна динамике регулирующего воздействия КРМ μ_k (согласованное изменение положения регулирующих органов подачи топлива, питательной воды, воздуха и т.д.).

Передаточные функции участков объекта регулирования получены в результате аппроксимации экспериментальных кривых разгона пылеугольного энергоблока № 3 Каширской ГРЭС мощностью 300 МВт при его работе на номинальной нагрузке при сжигании газа [5] и имеют следующий вид:

$$W_N^{\mu k}(s) = \frac{1.05e^{-5s}}{(1+90s)^2(1+20s)};$$

Таблица 1. Сопоставляемые варианты САУМ

Номер варианта САУМ	Схема САУМ	α	Номер рисунка
1	Комбинированная	1.0	3, а
2	Комбинированная	0.5	3, а
3	Комбинированная	0.2	3, а
4	САУМ-2	—	3, б
5	САУМ-2 с вводом дифференциатора в КРД	—	3, б
6	САУМ-1 с вводом дифференциатора в КРМ	—	3, в

Примечание. Коэффициент α ($0 < \alpha \leq 1.0$) характеризует степень ввода небаланса суммарного заданного значения мощности ($N_{зд \Sigma}$) и ее фактического значения (N) на вход КРМ.

$$W_N^{Hm}(s) = 0.7 \left[\frac{0.6}{(1+2s)^2} + \frac{0.4}{1+40s} \right] \times \left[1 - \frac{1}{(1+11s)^4(1+110s)} \right];$$

$$W_{p_i}^{\mu k}(s) = \frac{1.14e^{-5s}}{(1+75s)^2};$$

$$W_{p_i}^{Hm}(s) = -1.46 \left[\frac{0.27}{(1+2s)^2} + \frac{0.73}{(1+90s)^2(1+10s)} \right];$$

где $W_N^{\mu k}(s)$ – по каналу $\mu_k \rightarrow N$; $W_{p_i}^{\mu k}(s)$ – по каналу $\mu_k \rightarrow p_i$; $W_N^{Hm}(s)$ – по каналу $H_T \rightarrow N$; $W_{p_i}^{Hm}(s)$ – по каналу $H_T \rightarrow p_i$.

Турбина оснащена электронным регулятором скорости (РСТ), работающим по сигналу числа ее оборотов, характеризующим частоту сети f . Сформированный сигнал небаланса Δf поступает также на вход корректора частоты (КЧ).

Задание по мощности энергоблока $N_{зд \Sigma}$ формируется на основании трех составляющих:

задания по каналу первичного регулирования частоты $N_{зд}^n$, формируемого корректором частоты;

поступающего с общестанционного уровня САУМ задания по АВРЧ, принимаемого от районного (объединенного или центрального) пункта диспетчерского управления $N_{зд}^b$;

устанавливаемого оператором энергоблока заданного значения плановой составляющей мощ-

ности, соответствующей задаче третичного регулирования частоты $N_{зд}^r$.

Следует отметить, что сигналы задания по каналам вторичного и третичного регулирования преобразуются в соответствующих ограничителях темпа задания.

На рис. 3 для упрощения две последние составляющие имеют одно общее обозначение $N_{зд}$, а задание по каналу первичного регулирования, формируемое корректором частоты, обозначено как $N_{зд \text{ КЧ}}$.

Заданное значение давления пара перед турбиной $p_{т.зд}$ с учетом описанного ранее способа реализации комбинированного режима его регулирования формируется в виде кусочно-линейной функции от максимальной нагрузки энергоблока $N_{зд \Sigma}$ (рис. 4). Процесс перехода энергоблока от максимальной нагрузки к режиму скользящего давления (режим номинального давления) представляет собой горизонтальную прямую 1, режим скользящего давления – наклонную прямую 2, режим минимально допустимого значения давления – прямую 3.

Все предложенные варианты САУМ ориентированы на использование электронного регулятора скорости турбины и корректора частоты, формирующего коррекцию планового значения мощности энергоблока в соответствии с задачей первичного регулирования частоты.

Исследование выполнено для шести вариантов САУМ (см. табл. 1). Три первые из них (см. рис. 3, а) представляют собой комбинированную структуру, базирующуюся на варианте САУМ-1 с КРМ и дополнительной подачей небаланса мощности $N_{зд} - N$ на вход ТРМ. Вариант 1 с $\alpha = 1.0$

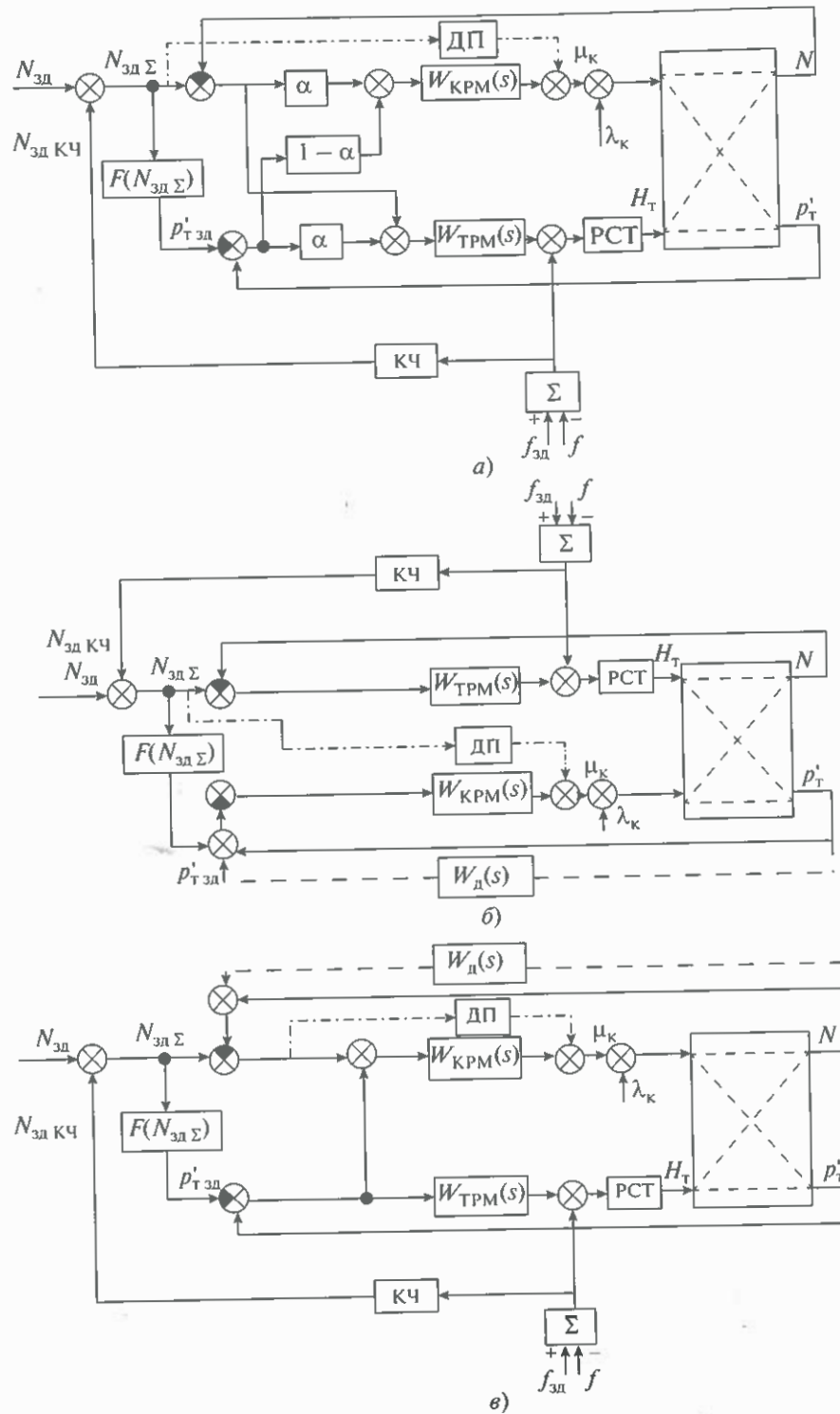


Рис. 3. Структурные схемы сопоставляемых вариантов САРЧМ.
Варианты: а - 1, 2, 3; б - 4, 5; в - 6

соответствует ранее принятой стандартной схеме САРЧМ [2], представляющей собой САУМ-1 с дополнительной подачей небаланса $N_{зд} - N$ на вход ТРМ. В варианте 2 с $\alpha = 0.5$ САУМ-1 и САУМ-2 в

каналах воздействия на котел и турбину "приравнены" одна другой, а вариант 3 с $\alpha = 0.2$ оказывается по своим динамическим характеристикам достаточно близким к САУМ-2.

Далее, при сравнении динамических свойств различных вариантов САУМ три варианта комбинированной схемы рассматриваются как независимые. В то же время, в связи с тем что они различаются только значением α , имеется возможность варьировать значение данного параметра в зависимости от режима работы энергоблока, вида действующего возмущения и т.д. и объединить эти варианты в один.

Вариант 4 представляет собой классическую САУМ-2, о недостатках которой речь шла ранее, а вариант 5 — уже упоминавшуюся усовершенствованную САУМ-2 [5, 6]. Вариант 5 обеспечивает существенное улучшение качества работы котельного регулятора благодаря вводу дополнительного дифференциатора со специальной методикой его настройки. И, наконец, вариант 6 — это модификация САУМ-1, в которой аналогично варианту 5 в КРМ вводится дополнительный дифференциатор с такой же методикой его настройки.

При внедрении САУМ широко используется структурное решение по вводу параллельно действию КРМ опережающего сигнала [1, 3], формируемого в динамическом преобразователе (ДП) путем П- или ПД-преобразований суммарного значения заданной мощности энергоблока $N_{зд \Sigma}$ без интегральной составляющей (показано штрихпунктирными линиями на рис. 3). Такое решение позволяет обеспечить форсировку котла при изменении заданной мощности энергоблока. Чаще оно применяется в вариантах САУМ-1 (варианты 1–3, 6) в целях достижения требуемой динамики изменения мощности энергоблока, в первую очередь для выполнения требований ОПРЧ и НПРЧ. В то же время возможно применение такого расширения структуры САУМ и для САУМ-2 (варианты 4, 5) с целью улучшить в режимах изменения нагрузки энергоблока качество поддержания давления пара перед турбиной. Факторы, влияющие на необходимость использования подобного решения, весьма разнообразны: мощность энергоблока, вид сжигаемого топлива, структурная реализация схем автоматического регулирования питания и топлива и т.д. Поэтому было решено провести сравнение рассматриваемых вариантов построения САУМ в исходном виде, без учета показанных штрихпунктирной линией дополнительных динамических преобразователей.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ КРМ

Определение оптимальных параметров настройки КРМ проводилось традиционными ме-

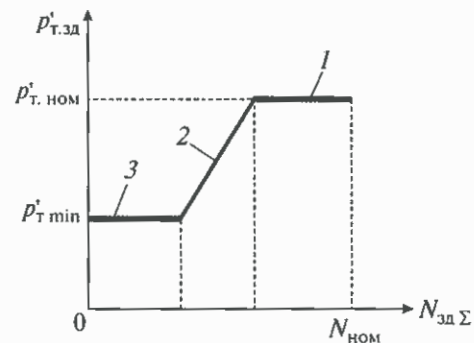


Рис. 4. Зависимость заданного значения давления пара перед турбиной $p_{т.зд}^i$ от заданного значения мощности энергоблока.

Режим давления: 1 — номинальное ($p_{т.ном}^i$); 2 — скользящее; 3 — минимальное ($p_{т.мин}^i$)

тодами [9] с использованием следующих критериев качества:

ограничения степени затухания переходных процессов $\psi \geq 0.9$;

минимизации квадратичного интегрального критерия I_2 по регулируемому параметру (мощности или давлению) при скачкообразном возмущении, что сводится к поиску точки минимального значения I_2 на границе заданного затухания.

Турбинный регулятор во всех схемах был настроен как быстродействующий стандартно для малоинерционных объектов ($k_p \cdot k_{об} = 1$; $T_n = 5$ с, где k_p и $k_{об}$ — коэффициенты усиления регулятора и объекта регулирования).

На рис. 5 представлены комплексные частотные характеристики эквивалентного объекта и области заданного затухания (ОЗЗ) при $\psi = 0.9$ параметров настройки КРМ для исследуемых вариантов САУМ. Оптимальные значения параметров настройки для различных схем, соответствующие минимуму I_2 , отмечены жирными точками.

Данные, представленные на рис. 5, позволяют грубо оценить запас устойчивости сравниваемых вариантов САУМ: на рис. 5, а — по степени удаленности годографа КЧХ от точки $(-1; 0)$, а на рис. 5, б — по «ширине» области заданного затухания. Существенные преимущества в степени запаса устойчивости имеют комбинированные схемы САУМ с $\alpha = 1.0$ (вариант 1) и $\alpha = 0.5$ (вариант 2), за ними следует схема САУМ-1 с дополнительным дифференциатором (вариант 6). Худшей по рассматриваемым критериям является «чистая» схема САУМ-2 (вариант 4). Ввод в эту структуру дополнительного дифференциатора (вариант 5) позволяет существенно улучшить ха-

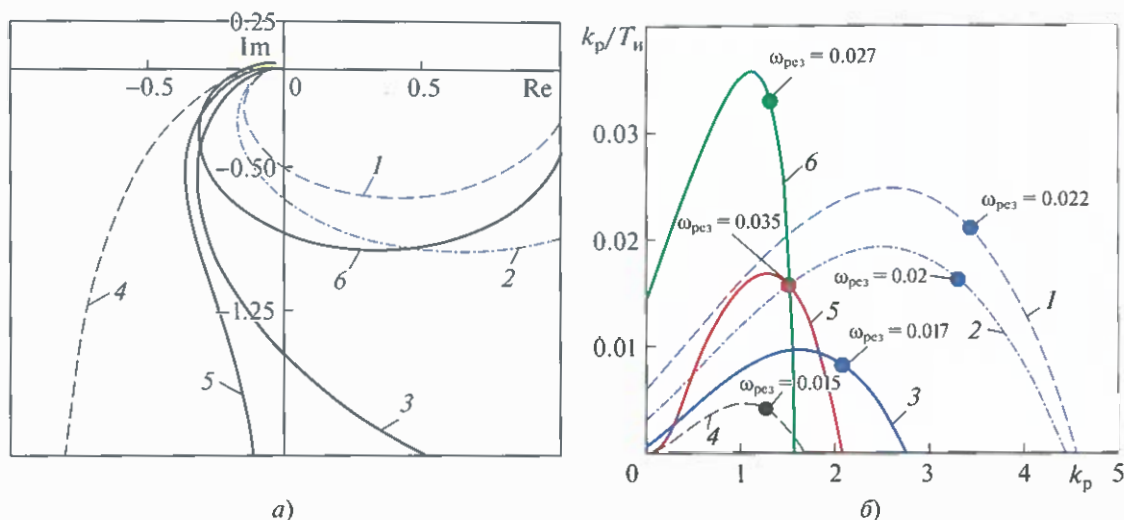


Рис. 5. Комплексные частотные характеристики эквивалентного объекта (а) и области заданного затухания котельного регулятора мощности (б).

Номера линий соответствуют номерам сопоставляемых вариантов САУМ

рактеристики котельного регулятора давления (КРД), разворачивая его КЧХ против часовой стрелки и увеличивая более чем в 3 раза оптимальное значение отношения k_p/T_n . Немного уступает этому варианту комбинированная САУМ с $\alpha = 0.2$ (вариант 3).

Хотелось бы остановиться на полученном эффекте существенного увеличения в варианте 5 по сравнению с вариантом 4 (более чем в 3 раза) оптимального значения отношения k_p/T_n , а также (более чем в 2 раза) резонансной частоты системы $\omega_{рез}$. Подобное усовершенствование системы автоматического регулирования благодаря переходу от ПИ-регулятора к ПИД-закону хорошо известно, но применялось оно, как правило, только для объектов с самовыравниванием (статических) и позволяло получить выигрыш в значении k_p/T_n не более чем в 2.0 раза. При рассмотрении объекта без самовыравнивания, такое решение [6] позволило достичь принципиально нового результата.

СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ В СОПОСТАВЛЯЕМЫХ ВАРИАНТАХ САУМ

Методика сравнения. Рассматриваемые варианты сравнивались по трем следующим показателям:

амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ), описывающим качество отработки возмущений в зависимости от их частотного спектра (рис. 6);

переходным процессам при скачкообразных возмущениях (рис. 7–9), позволяющим визуально сопоставить протекание процессов в различных вариантах схем САУМ при этих возмущениях и определить значения максимальных отклонений регулируемых параметров и регулирующих органов (табл. 2);

значениям интегральных квадратичных критериев, по которым можно количественно оценить качество процессов регулирования при скачкообразных возмущениях (табл. 3, 4).

Безусловно, существует связь в сравниваемых вариантах схем САУМ значений интегральных квадратичных критериев и максимальных отклонений регулируемых параметров. Как правило, если в одном из вариантов САУМ наблюдается меньшее значение интегрального квадратичного критерия одного из параметров, то будет достигнуто и меньшее максимальное отклонение того же параметра. Однако сами значения отношений критериев, как будет показано далее, могут быть различными.

Необходимо также отметить, что для САУМ анализ максимальных отклонений, причем как регулируемых параметров, так и регулирующих органов, очень важен. Дело в том, что, как правило, во время эксплуатации энергоблока работают с нагрузками в окрестности верхней (большую часть суток) и нижней (в ночное время) границ рабочего диапазона. При этом значения, близкие к граничным, может принимать не только давление пара, но и другие технологические параметры, связанные с изменением нагрузки. Эти пара-

Таблица 2. Абсолютные значения максимальных отклонений регулируемых параметров и регулирующих органов САРЧМ при рассматриваемых возмущениях

Номер варианта САРЧМ	Максимальные отклонения при изменении частоты сети, соответствующем $\Delta N_{зд}$ кч, на 10%				Максимальные отклонения при изменении $N_{зд}$ на 10%				Максимальные отклонения при возмущении нагрузкой котла λ_k на 10%			
	p'_T , МПа (ати)	N , МВт	μ_k , %	H_T , %	p'_T , МПа (ати)	N , МВт	μ_k , %	H_T , %	p'_T , МПа (ати)	N , МВт	μ_k , %	H_T , %
1	1.23 (12.5)	5.1	20.0	13.8	0.89 (9.1)	5.9	20.0	4.5	0.60 (6.1)	6.7	2.9	1.1
2	1.39 (14.2)	2.3	15.0	13.8	1.13 (11.5)	2.2	16.5	5.5	0.83 (8.5)	5.4	2.5	1.4
3	1.62 (16.5)	1.1	13.0	13.8	1.35 (13.8)	0.5	11.4	8.1	1.19 (12.1)	3.1	2.5	3.5
4	1.78 (18.2)	2.1	9.9	13.8	15.7 (16.0)	1.9	8.8	9.9	1.74 (17.8)	0.7	4.1	6.8
5	1.78 (18.2)	2.1	20.0	13.8	1.56 (15.9)	1.9	18.7	9.9	0.81 (8.3)	0.3	3.1	3.1
6	0.61 (6.2)	13.5	15.0	5.1	0.18 (1.8)	11.6	12.5	4.5	0.08 (0.8)	11.4	4.5	3.5

метры косвенно характеризуются изменением обобщенного параметра регулирующего органа котла μ_k , а именно давления газа перед горелками, расходов питательной воды и воздуха. Что же касается мощности энергоблока, то существенное ее перерегулирование может нарушить выполнение требований ОПРЧ и НПРЧ в процессе проведения испытаний.

Анализ качества процессов регулирования проводится для возмущений трех видов, связанных с изменением:

частоты сети (Δf), что отражает участие энергоблока в первичном регулировании частоты;

заданного значения мощности энергоблока ($\Delta N_{зд}$), включающего в себя как изменение задания оператором (в том числе и по диспетчерскому графику), так и отработку задания автоматического вторичного регулирования частоты;

нагрузки котла λ_k .

Из этих возмущений наиболее важным является изменение частоты сети Δf , так как отработка энергосистемных нарушений — первостепенная, наиболее ответственная задача как при эксплуатации энергоблока в целом, так и при автоматическом регулировании его частоты и мощности в частности. Именно качество отработки данного типа возмущений проверяется в процессе испытаний на соответствие энергоблока требованиям ОПРЧ и НПРЧ.

Изменение заданного значения мощности энергоблока является наиболее часто действующим

возмущением, так как энергоблоки работают в переменном графике изменения нагрузки. И хотя обычно эти возмущения имеют линейно нарастающий, а не скачкообразный вид, по значению они могут охватывать существенную часть рабочего диапазона изменения нагрузки.

Последний вид рассматриваемых возмущений — изменение нагрузки котла λ_k — это согласованное изменение положений регулирующих органов котла: подачи топлива, питательной воды, воздуха и т.д. Данное возмущение достаточно условно, так как реально действуют отдельные котельные возмущения по изменению расходов топлива, питательной воды и т.д. В отработке этих возмущений, наряду с КРМ, принимают участие, причем более эффективное, собственно автоматические системы регулирования: АСР подачи топлива, питательной воды и т.д. Однако их совместное действие, как отмечалось ранее, — предмет отдельных исследований [7, 8]. В то же время в рамках данной работы по сравнению различных вариантов САРЧМ анализ отработки λ_k позволяет оценить еще один аспект различия сопоставляемых структур САРЧМ.

Амплитудно-частотные характеристики (см. рис. 6) и значения интегральных квадратичных критериев (см. табл. 3, 4) представлены по каналам действия рассматриваемых возмущений на основные регулируемые величины САРЧМ: N и p'_T . Для оценки переходных процессов (см. рис. 7–9) наряду с регулируемыми величинами приведены и

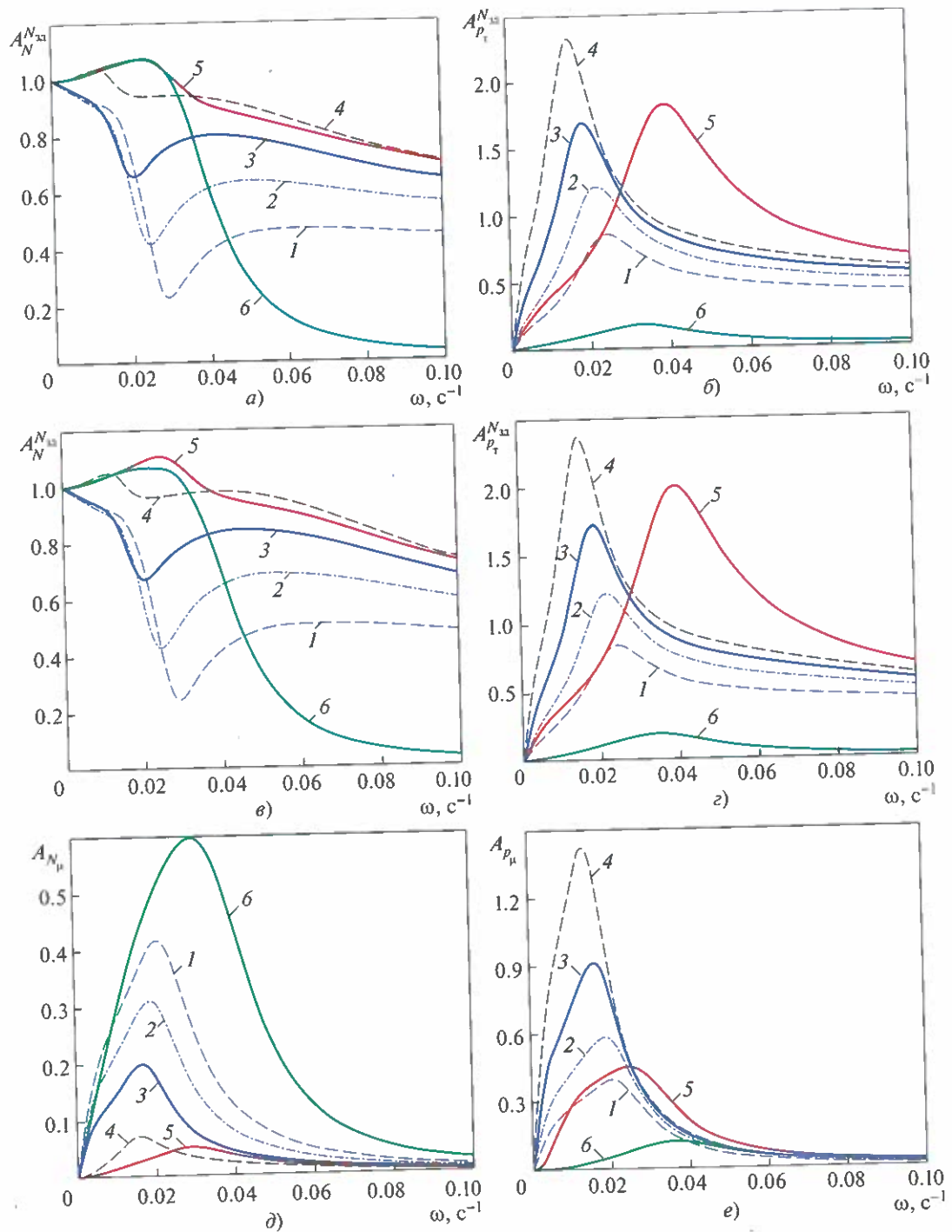


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики вариантов САРЧМ при поддержании мощности (а, в, д) и давления (б, з, е). Возмущение, вызванное изменением: а, б — частоты сети; в, з — заданного значения мощности энергоблока; д, е — нагрузки котла; номера линий соответствуют номерам сопоставляемых вариантов САУМ

кривые изменения характеристик основных регулирующих органов котла (μ_k) и турбины (H_T). Для соблюдения общности характера переходных процессов в сторону увеличения мощности энер-

гоблока знак возмущения по каналу отклонения частоты сети принят отрицательным.

Амплитудно-частотные характеристики. Из АЧХ шести представленных на рис. 6 каналов два

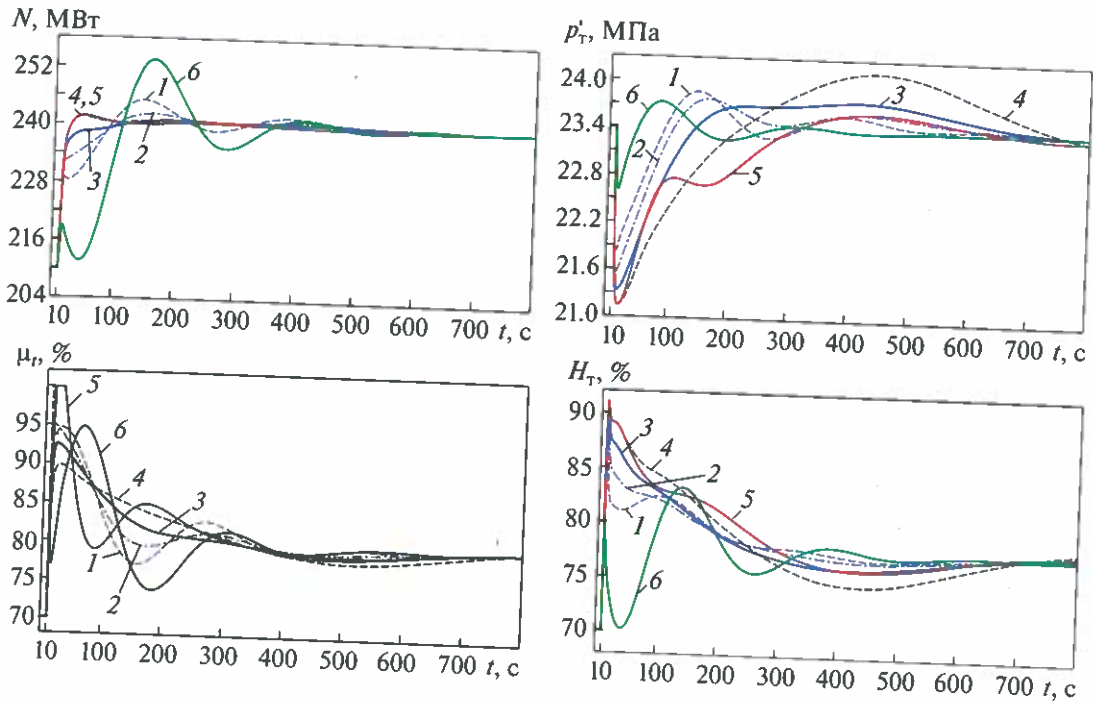


Рис. 7. Переходные процессы при возмущении, вызванном изменением частоты сети и соответствующем $\Delta N_{зд} KЧ = 10\%$. Номера линий соответствуют номерам сопоставляемых вариантов САУМ

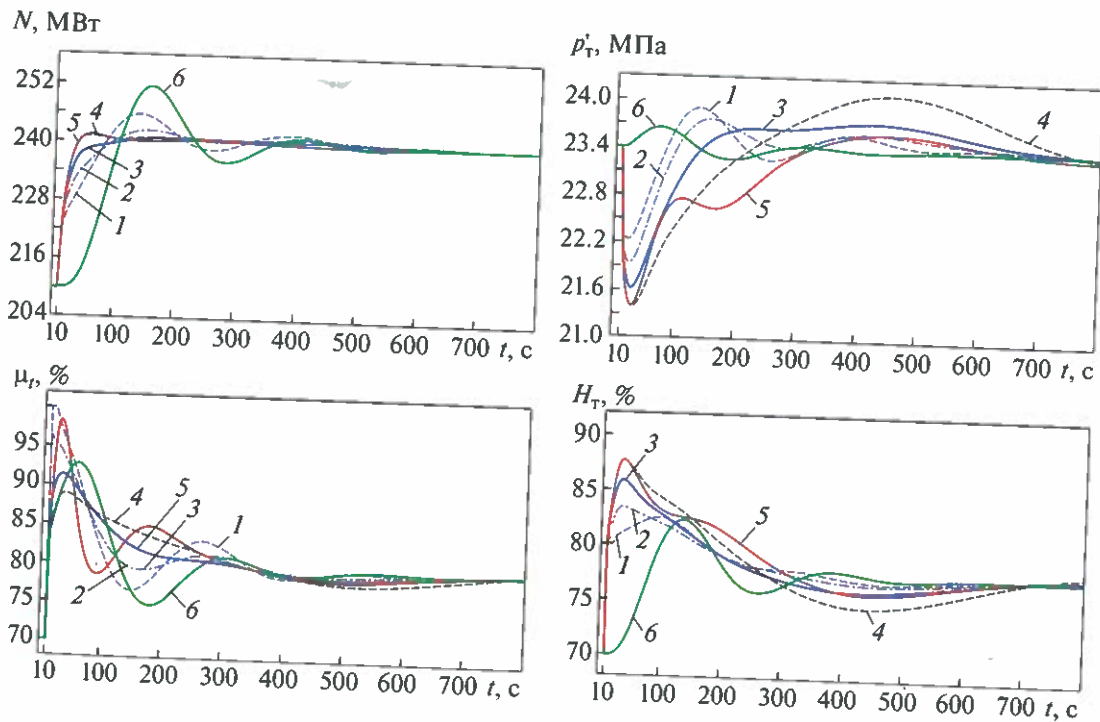


Рис. 8. Переходные процессы при возмущении, вызванном изменением значения мощности энергоблока $\Delta N_{зд} = 10\%$. Обозначения см. рис. 7

$(\Delta f \rightarrow N$ и $N_{зд} \rightarrow N)$ характеризуют реакцию мощности энергоблока на изменение ее задания. В этом случае значения АЧХ на нулевой частоте

равны 1. Из остальных четырех каналов три отражают реакцию на различные возмущения изменения мощности энергоблока и отклонения дав-

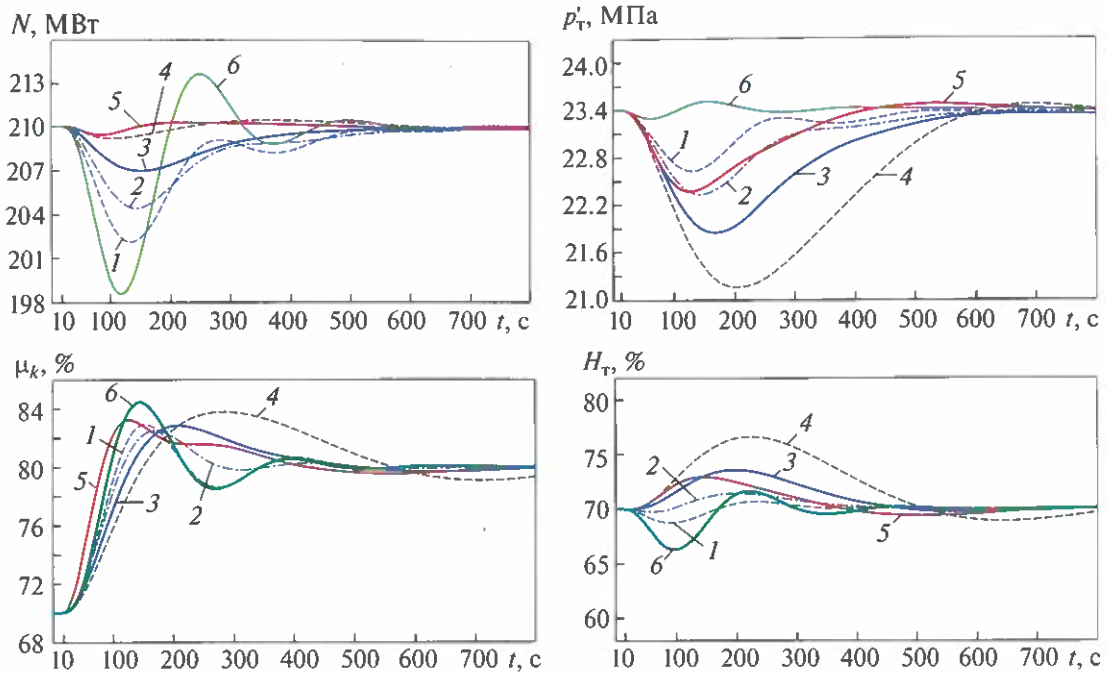


Рис. 9. Переходные процессы при возмущении, вызванном изменением нагрузки котла $\Delta\lambda_k = 10\%$. Обозначения см. рис. 7

ления пара перед турбиной, а один – реакцию мощности энергоблока на внутреннее котельное возмущение (канал $\lambda_k \rightarrow N$). Для всех этих четырех каналов АЧХ имеют на нулевой частоте нулевые значения. Соответственно в первом случае (для каналов $\Delta f \rightarrow N$ и $N_{зд} \rightarrow N$) качество отработки возмущения для каждого значения частоты

тем лучше, чем ближе значение АЧХ к единице, а во втором случае (все остальные каналы) – к нулю. Наибольший интерес представляет область низких частот, так как большинство возмущений являются низкочастотными.

В целом, как и следовало ожидать, для всех каналов поддержания мощности энергоблока (см. рис. 6) преимущество имеют структуры САРЧМ,

Таблица 3. Абсолютные значения интегральных квадратичных критериев в переходных процессах при возмущениях по различным каналам

Номер варианта САРЧМ	Возмущение отклонением частоты на 10%		Возмущение $N_{зд}$ на 10%		Возмущение нагрузкой котла на 10%	
	по p'_t , МПа ² ·с (ати ² ·с)	по N , МВт ² ·с	по p'_t , МПа ² ·с (ати ² ·с)	по N , МВт ² ·с	по p'_t , МПа ² ·с (ати ² ·с)	по N , МВт ² ·с
1	51.0 (5316)	9567	41.1 (4285)	12078	39.1 (4078)	6624
2	77.5 (8070)	4923	60.7 (6324)	7380	94.7 (9861)	4023
3	135.9 (14158)	2907	113.8 (11854)	5211	253.1 (26364)	1449
4	262.6 (27354)	2513	230.1 (23967)	4485	699.5 (72864)	108
5	165.6 (17253)	2509	151.0 (15725)	4480	87.1 (9072)	27
6	8.7 (904)	60066	2.9 (305)	56439	0.8 (81)	10494

Таблица 4. Относительные значения интегральных квадратичных критериев по отношению к минимальному по данному каналу

Номер варианта САУМ	Возмущение отклонением частоты на 10%		Возмущение $N_{зд}$ на 10%		Возмущение нагрузкой котла на 10%	
	по p_T'	по N	по p_T'	по N	по p_T'	по N
1	1.0	3.8	1.0	2.7	1.0	245.0
2	1.5	2.0	1.5	1.6	2.4	149.0
3	2.6	1.2	2.8	1.2	6.5	53.6
5	3.2	1.0	3.7	1.0	2.2	1.0

повторяющие или близкие САУМ-2 (варианты 4 и 5), а для каналов поддержания давления пара перед турбиной (см. рис. 6) лучшее качество регулирования обеспечивается структурами САУМ, повторяющими или близкими САУМ-1 (варианты 6, 1–3).

В каналах регулирования мощности энергоблока при возмущениях $f \rightarrow N$ и $N_{зд} \rightarrow N$ лучшими являются варианты САУМ-2 (варианты 4 и 5), в области низких частот им близок вариант 6 – усовершенствованная САУМ-1, преимущества которой уменьшаются по мере увеличения частоты сети. Все три варианта комбинированной структуры (1–3) проигрывают вариантам САУМ-2 с ухудшением качества регулирования при повышении α : вариант 3 ($\alpha = 0.2$), вариант 2 ($\alpha = 0.5$), вариант 1 ($\alpha = 1.0$).

Похожее соотношение сохраняется в качестве поддержания мощности энергоблока и при колебательном возмущении (канал $\lambda_k \rightarrow N$). Отличия состоят в том, что, во-первых, вариант 6 (САУМ-1) явно проигрывает всем остальным вариантам и, во-вторых, в области низких частот более ощутимы преимущества модернизированного варианта САУМ-2 (вариант 5) над исходным (вариант 4).

Для поддержания давления (см. рис. 6) лучшей является чистая САУМ-1 (вариант 6), а худшей – чистая САУМ-2 (вариант 4). Далее за САУМ-1 идут комбинированная схема с $\alpha = 1.0$ (вариант 1), что закономерно, а также улучшенная САУМ-2 (вариант 5), что исходно представлялось не столь очевидным. В наиболее низкочастотной области ($\omega < 0.01$) небольшим преимуществом обладает вариант 5, в остальной части частотного диапазона некоторое преимущество имеет вариант 1. При $\omega > 0.025$ вариант 5 немного уступает вариантам 2–4.

Тот же вариант 6 (САУМ-1 с дифференцированием давления) оказывается лучшим для поддержания давления пара при изменении $N_{зд}$, а

худшим – чистая САУМ-2 (вариант 4). Вслед за вариантом 6 (усовершенствованная САУМ-1) в области низких частот следуют комбинированная схема с $\alpha = 1.0$ (вариант 1) и усовершенствованная САУМ-2 (вариант 5), которая в области более высоких частот уступает всем другим вариантам.

Качество переходных процессов. Сравнение динамики регулирования сопоставляемых вариантов САУМ при скачкообразных возмущениях производится по двум оценкам качества переходных процессов:

их вида (см. рис. 7–9), включая значения максимальных отклонений регулируемых параметров и регулирующих органов (см. табл. 2);

значений интегральных квадратичных критериев по регулируемым величинам (см. табл. 3, 4).

В табл. 3 приведены абсолютные значения интегральных квадратичных критериев в переходных процессах при 10%-ных возмущениях по разным каналам. Как видно из этой таблицы, при всех возмущениях вариант 6 оказывается худшим для поддержания мощности энергоблока, а вариант 4 – давления пара перед турбиной. Поэтому в качестве основной для сравнения интегральных квадратичных критериев используется табл. 4, в которой эти два варианта отсутствуют. Для наглядности в каждой колонке таблицы осуществлен переход от абсолютных значений критериев к относительным путем деления их числовых значений на минимальные из оставшихся в рассмотрении вариантов.

Возмущение изменением частоты сети (см. рис. 7). Лучшее качество переходных процессов по мощности энергоблока наблюдается для вариантов 4 и 5, худшее – для варианта 6. Последнее проявляется в соотношении значений критериев качества, а также ввиду колебательной формы переходного процесса, существенно нарушающей требования ОПРЧ и НПРЧ. Не очень сильно уступает вариантам 4 и 5 вариант 3 (комбиниро-

ванная схема с $\alpha = 0.2$). Более существенны эти различия для варианта 2 ($\alpha = 0.5$) и особенно варианта 1 ($\alpha = 1.0$).

Для регулирования давления пара лучшим является вариант 6. Далее следуют варианты 1, 2, 3, 5; худшим является вариант 4.

Если воспользоваться данными табл. 4 и из трех рассматриваемых вариантов комбинированной схемы САРЧМ ограничиться ее промежуточным вариантом 2 ($\alpha = 0.5$), то будет видно, что получаемый выигрыш в качестве поддержания давления по сравнению с вариантом 5 (улучшенной САУМ-2) составляет 2.13 раза, что немного больше проигрыша в качестве поддержания мощности (2 раза). Таким образом, по соотношению значений интегральных квадратичных критериев поддержания мощности энергоблока и давления пара эти варианты схем довольно близки.

При сравнении же максимальных отклонений мощности и давления при переходных процессах (см. табл. 2) увеличивается различие между вариантами в пользу варианта 2: выигрыш варианта 5 в максимальном отклонении мощности по сравнению с вариантом 2 составляет 1.1 раза, а соответствующий выигрыш варианта 2 по сравнению с вариантом 5 в максимальном отклонении давления достигает 1.28 раза. Кроме того, в варианте 2 по сравнению с вариантом 5 оказывается заметно меньшим (на 25%) максимальное отклонение обобщенного регулирующего воздействия котла μ_k .

Возмущение изменением заданного значения мощности энергоблока (см. рис. 8). В целом, общий вид соотношения качества процессов регулирования в сравниваемых вариантах САРЧМ остается схожим с возмущением изменением частоты. Точно так же варианты 4 и 5 остаются лучшими для поддержания мощности, а остальные — для поддержания давления. Если, как и ранее, ограничиться вариантами 2 и 5, то отличия, как видно из табл. 3 и 4, оказываются в пользу варианта 2. Проигрыш в значении интегрального критерия по мощности энергоблока в схеме 2 по сравнению со схемой 5 уменьшается с 2 до 1.6 раза, а выигрыш в качестве поддержания давления увеличивается с 2.13 до 2.46 раза. Для отношений максимальных отклонений мощности и давления тенденция изменений несколько иная: проигрыш в отклонении по мощности варианта 2 по сравнению с вариантом 5 немного увеличился: от 1.10 до 1.15 раза, но также увеличился, причем на большее значение, и выигрыш в отклонении по давлению — с 1.28 до 1.38 раза. В то же время разность значений максимальных отклонений обобщенного регулирующего воздействия котла μ_k в вариантах 2 и 5 уменьшилась, причем более чем в 2 раза.

Возмущение изменением нагрузки котла (см. рис. 9). Как видно из формы переходных процессов, влияние этого возмущения существенно отличается от рассмотренных ранее.

Во-первых, в этом случае переходные процессы проходят более медленно. Так, при возмущениях изменениями частоты сети и заданного значения мощности энергоблока (см. рис. 7–8) максимальные отклонения регулируемых параметров и регулирующих органов достигались в среднем за 20–30 с. Для возмущения изменением нагрузки котла аналогичный период времени составляет 130–140 с. Это связано с тем, что котел обладает существенной инерционностью и даже скачкообразное воздействие на технологические процессы в энергоблоке проявляется существенно медленнее, чем скачкообразное перемещение клапанов паровой турбины, вызываемое первыми двумя типами возмущений.

Во-вторых, если при рассмотренных ранее возмущениях их обработка происходит разнонаправленным изменением мощности и давления, то здесь в ходе переходного процесса оба регулируемых параметра отклоняются в одну и ту же сторону.

Заметно меняется при этом и различие в качестве процессов регулирования между сравниваемыми вариантами. Благодаря относительно медленной скорости действия возмущения на процесс и “правильному” направлению перемещения клапанов турбины (H_T) в вариантах САРЧМ, близких к САУМ-2 (варианты 4, 5 и 3), по сравнению с ранее рассмотренными возмущениями:

возрастают их преимущества в качестве поддержания мощности энергоблока;

снижаются преимущества в качестве поддержания давления вариантов комбинированной структуры САУМ (варианты 1–3) по сравнению с вариантом 5 (усовершенствованная САУМ-2).

Лучшей в решении этой задачи остается усовершенствованная САУМ-1 (вариант 6), но ее огромный проигрыш в качестве поддержания мощности при возмущении нагрузкой котла не позволяет рассматривать данный вариант как перспективный к применению.

Если обратиться к табл. 4, то в качестве поддержания мощности энергоблока при возмущении λ_k существенные преимущества по значениям интегральных квадратичных критериев остальных вариантов САРЧМ имеет вариант 5 — усовершенствованная САУМ-2. Для регулирования давления лучшим по значениям квадратичных интегральных критериев оказывается вариант 1 ($\alpha = 1.0$), а вариант 2 ($\alpha = 0.5$) усту-

пает и варианту 5. Такое же соотношение между этими четырьмя вариантами остается в силе и для максимальных отклонений регулируемых параметров p_T^* и N (см. табл. 2).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕННОГО АНАЛИЗА

Из шести рассмотренных вариантов САРЧМ наиболее предпочтительными являются четыре: комбинированная САРЧМ с тремя значениями α — варианты 1 ($\alpha = 1.0$), 2 ($\alpha = 0.5$), 3 ($\alpha = 0.2$) — и усовершенствованная САУМ-2 (вариант 5). При упрощенном сравнении из трех вариантов комбинированной системы чаще всего принимается “усредненный” вариант 2 с $\alpha = 0.5$. В то же время имеется принципиальная возможность автоматического изменения значения α в процессе эксплуатации САРЧМ (что не раз применялось на реальных объектах). Это дает возможность использовать одно значение α (в диапазоне от 0.5 до 1.0) в режиме нормальной эксплуатации со сменой его на другое значение в диапазоне от 0.15 до 0.5 (с 0.5 на 0.2) в режимах изменения частоты и/или заданной мощности энергоблока.

Проведенные исследования показали, что для основных типов возмущений (изменение частоты и заданной мощности) варианты комбинированной САРЧМ имеют преимущество в качестве регулирования давления пара, а усовершенствованная САУМ-2 — в качестве регулирования мощности энергоблока, причем в первом случае преимущества несколько больше, чем во втором.

Более точное регулирование мощности энергоблока при использовании усовершенствованного варианта САУМ-2 упрощает выполнение требований ОПРЧ и НПРЧ, обеспечивает более строгое соблюдение графика изменения нагрузки. При применении комбинированного варианта САРЧМ благодаря более высокому качеству поддержания давления снижается вероятность исчерпания диапазона регулирования энергоблока, т.е. достижения уставок срабатывания быстрого редуцирующе-охлаждающего устройства и предохранительных клапанов, минимального значения давления пара и т.д. Кроме того, повышение качества поддержания давления уменьшает степень взаимодействия САРЧМ с регуляторами температуры пара в промежуточном сечении пароводяного тракта котла, особенно в тех случаях (для более крупных энергоблоков), когда данное сечение тракта перед первым впрыском оказывается в зоне максимальной теплоемкости.

Оба варианта САУМ нашли широкое применение на практике и в течение длительного вре-

мени успешно эксплуатируются на нескольких десятках газомазутных и пылеугольных энергоблоков мощностью 300, 500 и 800 МВт, удовлетворяя требованиям ОПРЧ, НПРЧ и АВРЧ. Опыт их внедрения будет отражен в отдельной публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Разработка** и внедрение САРЧМ крупных энергоблоков / В.А. Биленко, А.Д. Меламед, Э.Э. Микушевич, Д.Ю. Никольский, Р.Л. Рогачев, Н.А. Романов // Теплоэнергетика. 2008. № 10. С. 14–26.
2. **Система** автоматического регулирования частоты и мощности блочных ТЭС с прямоточными котлами / Н.И. Давыдов, А.Д. Меламед, М.Д. Трахтенберг, Л.П. Фотин // Теплоэнергетика. 1979. № 8. С. 2–6.
3. **Система** автоматического управления мощностью энергоблока 300 МВт Конаковской ГРЭС / Н.И. Давыдов, А.А. Григоренко, Н.В. Зорченко, М.Ф. Павлова, В.В. Башарин, А.А. Назаров, В.И. Байбара, В.Г. Бабыкин, В.В. Ануфриев, П.И. Коротенков // Теплоэнергетика. 2006. № 7. С. 43–49.
4. **Модернизация** АСУ ТП энергоблоков 800 МВт Березовской ГРЭС-1 / В.В. Белый, Ю.А. Киселев, В.А. Савостьянов, А.С. Ладохин, В.А. Биленко, А.И. Гальперина, В.В. Мезин, Э.Э. Микушевич, Д.Ю. Никольский, Д.В. Плотников, О.Г. Плотникова // Электрические станции. 2004. № 1. С. 49–59.
5. **Жигунов В.В., Шавочкин И.А.** Повышение эффективности управления мощностью энергоблоков с применением дифференцирования в котельном регуляторе давления пара перед турбиной // Теплоэнергетика. 2011. № 10. С. 60–69.
6. **Жигунов В.В.** Исследование и внедрение автоматических систем регулирования для интегрируемых объектов в теплоэнергетике: дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2017.
7. **Система** регулирования энергоблока 300 МВт с прямоточным парогенератором применительно к условиям работы в комбинированном режиме изменения давления / Н.И. Давыдов, А.В. Дубинский, Е.Г. Козырева, А.Д. Меламед, В.З. Чесноковский // Теплоэнергетика. 1976. № 8. С. 14–22.
8. **Анализ** динамики многосвязной системы регулирования мощности и температуры энергоблока с прямоточным котлом / В.А. Биленко, Н.И. Давыдов, В.З. Чесноковский, Н.П. Росич // Теплоэнергетика. 1987. № 10. С. 11–17.
9. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Изд-во МЭИ, 2004. С. 131–141.